

MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN AMBIENTE ECOSIMPRO DE UNA CÁMARA DE SECADO PARA CACAO

Pablo Parra Rosero^{1,*}, Rafael Saavedra² y William Ipanaqué³

Resumen

En este artículo se presenta el sistema de ecuaciones utilizado para describir el modelo físico de una cámara para secado artificial de cacao. El modelo corresponde a un secador cilíndrico rotatorio equicorriente y se considera solamente la cámara de secado. Las ecuaciones de conservación de masa y de energía junto a algunas correlaciones obtenidas como resultado de ensayos experimentales se han implementado en un componente ensamblado en la plataforma de EcosimPro. Finalmente, se realiza un análisis de las curvas de masa, humedad y temperatura, obtenidas luego de realizar una simulación durante 10 horas de operación del sistema.

Palabras clave: modelo, simulación, masa, energía, humedad, secador.

Abstract

This article presents the system of equations used to describe the physical model of a camera for artificial drying of cocoa. The pattern corresponds to a rotating cylindrical dryer in cocurrent and is considered drying camera only. The equations of conservation of mass and energy with some correlations obtained by means of experimental tests have been implemented in a component assembly EcosimPro platform. Finally, presents an analysis of the mass curves, humidity and temperature obtained after performing a simulation during 10 hours of system operation.

Keywords: model, simulation, mass, energy, moisture, dryer.

^{1,*} *Máster en Producción Automatizada y Robótica Industrial, Ingeniero en Electricidad, Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería DICOP - UDEP, Perú, Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana. Autor para correspondencia ✉: pparra@ups.edu.ec*

² *Doctor en Informática Industrial, Politécnico de Milán, Italia, Ingeniero Industrial, Profesor ordinario principal, Universidad de Piura, Perú.*

³ *Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Mecánica y Electricidad, Universidad de Piura, Perú.*

Recibido: 07 - Noviembre - 2012, Aprobado tras revisión: 29 - Noviembre - 2012

Forma sugerida de citación: Parra, P.; Saavedra, R. y Ipanaqué, W. (2012). "Modelación y simulación en ambiente Ecosimpro de una cámara de secado para Cacao". *INGENIUS*. N.º8, (Julio/Diciembre). pp. 54-60. ISSN: 1390-650X

1. Introducción

En la actualidad, Ecuador es el sexto productor de cacao híbrido y el primer productor de cacao fino de aroma a nivel mundial. Perú ha incrementado considerablemente su producción de cacao durante los últimos años. En ambos países el proceso de secado es predominantemente natural. Los sistemas de secado industrial están sujetos a grandes inversiones, por lo tanto los pequeños productores no tienen acceso a este proceso de secado de forma directa. El proceso de secado es común en varias industrias, fenómenos de transmisión de calor y transferencia de masa están involucrados en este proceso [1].

Hay varios tipos de secadores, los rotatorios son ampliamente aplicados, algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica: [2] describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar; [3] presenta un modelo aplicado a desechos vegetales; [4] modela un secador aplicando un control basado en modelos. No obstante la información científica en secadores aplicados a secado de cacao es muy escasa, ello ha motivado también el inicio de esta investigación.

A través de este trabajo se aspira obtener un modelo para un sistema de secado a baja escala, es decir, que permita el secado de pequeñas cantidades de cacao, pero, en cortos períodos de tiempo. Un pequeño productor podría secar alrededor de un cuarto de tonelada de cacao en un tiempo promedio de entre diez y doce horas. Con el proceso natural se requieren entre cuatro y seis días con condiciones climáticas óptimas.

Existen dos alternativas básicas para el proceso de secado de cacao. El secado natural, utilizando la energía solar térmica y el artificial que puede utilizar diferentes tecnologías y fuentes de energía para el proceso. La utilización del secado natural conlleva varias dependencias inherentes a los factores climáticos.

La ausencia de sol o la presencia de lluvia en algunas ocasiones suele prolongarse por un periodo de varios días consecutivos. Una vez cosechado el cacao, requiere ser fermentado de forma inmediata y consecutivamente debe ser sometido al proceso de secado. Si los factores climáticos no hacen factible el secado, entonces la producción se hecha a perder.

Los sistemas de secado artificial, de uso básicamente industrial, permiten efectuar el proceso de secado de forma independiente a los factores climáticos de la época o temporada. Existen diferentes tipos de secadores industriales, la mayoría de ellos utilizan la circulación de aire caliente a través de una cámara para conseguir la evaporación del agua contenida en el producto a secar.

En aplicaciones agroindustriales se utiliza un tipo particular de secador, denominado secador rotatorio. Este sistema puede hacer circular aire caliente en equicorriente o en contracorriente. En los secadores rotatorios se identifican tres partes fundamentales: la cámara de combustión, la cámara de secado y el ventilador de empuje o de tiro encargado de facilitar la circulación del aire caliente.

Existen varios trabajos de investigación orientados al diseño y modelación de secadores rotatorios. Se han estudiado secadores de cemento, de arena, de cáscara de limón y algunos otros productos de alimentación, pero, no existe un estudio orientado específicamente al secado de cacao en sistemas rotatorios. El presente trabajo considera únicamente el modelo matemático de la cámara de secado, dejando el análisis de la cámara de calentamiento y del ventilador de empuje o tiro de aire para la integración futura del sistema de secado completo.

Se describe el sistema de ecuaciones diferenciales que predice el comportamiento dinámico del proceso. Además, se utilizan las correlaciones propuestas en [5], las mismas que permiten obtener los valores del paso temporal y coeficiente volumétrico de transmisión de calor.

Utilizando la plataforma comercial EcosimPro, se ingresan el sistema de ecuaciones, las condiciones de frontera variables en el tiempo y valores explícitos para ensamblar el modelo. Posteriormente se simula y se analiza el comportamiento del mismo.

2. Materiales y métodos

En [6] se presenta un sistema de ecuaciones para la transferencia de masa y calor en el proceso de secado de cacao.

En [1] se muestra un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de un secador de arena. Se toma como base este trabajo y se ejecutan los cálculos y configuraciones de los parámetros del modelo para adaptarlo al secado de cacao.

El modelo matemático del secador de cacao se plantea bajo las siguientes consideraciones:

- Se realiza el análisis únicamente de la cámara de secado. El presente estudio no toma en cuenta la cámara de combustión o generador de aire caliente.
- La cámara de secado es un cilindro giratorio con flujo de aire en equicorriente. El cilindro tiene una ligera inclinación no mayor a 3 %.

- Se desprecian los fenómenos de difusión, radiación y conducción. En el proceso se desarrolla una transferencia de calor predominantemente por efecto de convección.
- Se consideran constantes a los coeficientes de transferencia de masa y de energía.
- El calor específico del cacao es constante. Se toma este valor con referencia al cacao fermentado con un nivel de humedad del 56 %.
- El cilindro rota con una velocidad constante, lo que implica un avance del cacao a velocidad constante.
- El generador de aire caliente (cámara de combustión), hace circular gas (aire caliente) a velocidad constante a través del cilindro (cámara de secado).

En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura utilizada para las constantes y variables que intervienen en el proceso con sus respectivas unidades.

Un esquema de las variables que se consideran en la cámara de secado se muestra en la Figura 1. Básicamente intervienen flujo másico, temperatura, masa y humedad tanto para el sólido como para el gas.

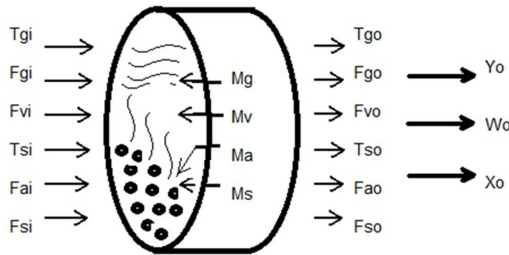


Figura 1. Cámara de secado. Variables que intervienen en el proceso.

A la entrada del cilindro ingresa cacao húmedo, el mismo que contiene una parte sólida y una parte de agua. Las ecuaciones de conservación de masa se expresan como:

La Ecuación 1 representa la dinámica de la variación de la masa del cacao (parte sólida).

$$\frac{d(Mso)}{dt} = Fsi - Fso \quad (1)$$

La dinámica del comportamiento del agua se describe a través de la Ecuación 2.

$$\frac{d(Mao)}{dt} = Fai - Fao - Wo \quad (2)$$

La Ecuación 3 representa el balance de masa del gas seco.

Tabla 1. Variables que intervienen en el sistema secador.

| Abr. | Descripción | Unid. |
|------|--|----------------------|
| Tgi | Temperatura del gas a la entrada | °C |
| Fgi | Flujo másico de gas a la entrada | kg/s |
| Fvi | Flujo de vapor contenido en el gas a la entrada | kg/s |
| Tsi | Temperatura del cacao a la entrada | °C |
| Fai | Flujo másico de agua contenida en el sólido a la entrada | kg/s |
| Fsi | Flujo másico de cacao a la entrada | kg/s |
| Mg | Masa de gas | kg |
| Mv | Masa de vapor contenida en el gas | kg |
| Ma | Masa de agua contenida en el cacao | kg |
| Ms | Masa de cacao | kg |
| Tgo | Temperatura del gas a la salida | °C |
| Fgo | Flujo másico de gas a la salida | kg/s |
| Fvo | Flujo de vapor contenido en el gas a la salida | kg/s |
| Tso | Temperatura del cacao a la salida | °C |
| Fao | Flujo másico de agua contenida en el sólido a la salida | kg/s |
| Fso | Flujo másico de cacao a la salida | kg/s |
| H | Humedad del cacao en base húmeda | |
| Yo | Humedad del gas en base seca | |
| Wo | Flujo másico de agua evaporada | kg/s |
| Xo | Humedad del sólido en base seca | |
| V | Volumen del cilindro | m ³ |
| Ua | Coefficiente volumétrico de transmisión de calor | kW/m ³ °C |
| Pa | Presión del gas | Pa |
| Cpa | Calor específico del agua | kJ/kg °C |
| Cpg | Calor específico a presión constante del gas seco | kJ/kg°C |
| Cpv | Calor específico a presión constante del vapor de agua | kJ/ kg°C |
| Cps | Calor específico del cacao | kJ/ Kg°C |

$$\frac{d(Mgo)}{dt} = Fgi - Fgo \quad (3)$$

La Ecuación 4 describe el balance de masa de vapor de agua.

$$\frac{d(Mvo)}{dt} = Fvi - Fvo + Wo \quad (4)$$

Se plantean dos ecuaciones de conservación de energía, una para la fase sólida y otra para la fase gaseosa.

La Ecuación 5 corresponde a la fase sólida:

$$\begin{aligned} \frac{d[(Cps \times Mso + Cpa \times Mao) \times Tso]}{dt} = & \\ (Fsi \times Cps + Fai \times Cpa) \times Tsi - \dots & \\ \dots - (Fso \times Cps + Fao \times Cpa) \times Tso - \dots & \\ \dots - Wo \times (Cpa \times Tso + \lambda) + \dots & \\ \dots + Ua \times V \times (Tgo - Tso) & \end{aligned} \quad (5)$$

La Ecuación 6 corresponde a la fase gaseosa:

$$\begin{aligned} \frac{d[(Cpv \times Mvo + Cpg \times Mgo) \times Tgo]}{dt} = & \\ (Fgi \times Cpg + Fvi \times Cpv) \times Tgi + \dots & \\ \dots + (Fgo \times Cpg + Fvo \times Cpv) \times Tgo + \dots & \\ \dots + Wo \times (Cpa \times Tso + \lambda) - \dots & \\ \dots - Ua \times V \times (Tgo - Tso) & \end{aligned} \quad (6)$$

Se establecen las ecuaciones de humedad en base seca y en función de las masas y de los flujos, tanto para el sólido (cacao) como para el vapor de agua contenido en el gas (aire caliente) que circula dentro de la cámara.

En función de los flujos másicos, para el cacao se plantea la Ecuación 7.

$$Xo = \frac{Fao}{Fso} \quad (7)$$

En la Ecuación 8 se representa la humedad en función de los flujos para el vapor.

$$Yo = \frac{Fvo}{Fgo} \quad (8)$$

Las Ecuaciones 9 y 10 expresan la humedad en base seca en función de las masas, para el cacao y para el vapor, respectivamente.

$$Xo = \frac{Mao}{Mso} \quad (9)$$

$$Yo = \frac{Mvo}{Mgo} \quad (10)$$

La relación entre la masa de gas seco contenida en el cilindro con la temperatura y la masa del gas está dada por la Ecuación 11.

$$\begin{aligned} Mgo = \left(V - \frac{Mso}{s} \right) \times \left(\frac{pmg \times pma}{pmg \times (Yo + pma)} \right) \times \dots \\ \dots \times \left(\frac{Pa}{R(Tgo + 273)} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Donde s es la densidad del cacao (sólido seco), pmg es el peso molecular del gas (aire caliente), pma es el peso molecular del agua y R es la constante universal de los gases. La relación entre la masa del sólido y el flujo del sólido se establece en la Ecuación 12.

$$Mso = tpaso \times Fso \quad (12)$$

La Ecuación 13 muestra la relación del flujo de evaporación Wo .

$$Wo = Vevap \times Mso \quad (13)$$

Las Ecuaciones 14, 15 y 16 representan la humedad, la velocidad del gas y la densidad del cacao a la salida del cilindro secador.

$$Ho = \frac{Xo}{1 + Xo} \quad (14)$$

$$Vgo = \frac{Fgo}{o \times areao} \quad (15)$$

$$o = \frac{pmg \times Pa}{R \times (Tgo + 273)} \quad (16)$$

En [5] se presentan estudios de secadores rotatorios establecen una correlación para determinar el tiempo de paso del producto a través del cilindro. Esta correlación considera la longitud, velocidad angular, inclinación, diámetro, forma de los vuelos o aletas interiores del cilindro (17). Además, se toman en cuenta la granulometría, viscosidad y adherencia como características del sólido a secar, en este caso del cacao.

$$tpaso = \frac{0,23 \times L}{S \times N^3 \times D} - 9,84 \times Dp^{-0,5} \times \frac{L \times G}{F} \quad (17)$$

Donde el tiempo de paso ($tpaso$) está dado en minutos, la longitud del cilindro (L) en metros y la velocidad angular (N) en rpm . S es la inclinación del cilindro, (G) el flujo de gas, (F) el flujo de sólido y (Dp) el tamaño promedio de las partículas de sólido a secar.

En la Tabla 2 se detallan los valores considerados y obtenidos en la aplicación de la correlación de [5].

Tabla 2. Valores considerados para el cálculo del tiempo de paso.

| Abr. | Valor | Unid. |
|-------|--------------|---------------|
| L | 2 | m |
| S | 0.0087 (0.5) | |
| Dp | 15000 | μm |
| N | 1 | rpm |
| D | 0.5 | m |
| G | 0.5 | kg/s |
| F | 0.05 | kg/s |
| tpaso | 6229 | s |

Para la determinación del coeficiente volumétrico de transmisión de calor se han considerado fuentes bibliográficas como: [5], [7], [8].

Mediante análisis estadísticos presentados en [5], se estable la correlación (18).

$$Ua = K \times \frac{G^n}{D} \quad (18)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad, G representa el flujo másico de gas secante por unidad de área transversal, D el diámetro del cilindro y n constante. El valor de Ua dependerá de la geometría del cilindro, las constantes K y n serán especificadas para cada caso.

En [7] se realizó un aporte estableciendo que se debería tomar en cuenta la geometría de los vuelos y la velocidad de rotación del cilindro para la determinación del valor K . De sus análisis estadísticos sugiere utilizar valores de n ente 0,46 y 0,67.

Para el presente trabajo no se ha contado con una planta experimental o industrial para poder determinar mediante ensayos los valores de K y n , por lo tanto se ha considerado factible utilizar los valores propuestos en [8] para secadores rotatorios comerciales. $K = 0,8254$ y $n = 0,67$.

Considerando que el flujo másico de aire caliente es de 0.5 kg/s y que el área transversal del cilindro es de $0,1963 \text{ m}^2$, se calcula un valor de $Ua = 0.20706 \text{ kW/m}^3\text{C}$.

3. Resultados y discusión

Una vez presentado el modelo matemático para el secador rotatorio y estimados los valores de tiempo de paso y coeficiente volumétrico de transmisión de calor, se procedió a crear un componente dentro del entorno

de EcosimPro. Este software permite ingresar todas las ecuaciones algebraicas y diferenciales ordinarias sin guardar un orden específico. Es necesario dentro del componente especificar o declarar todas las variables del modelo e ingresar los valores de todas las constantes requeridas.

La compilación del componente permitirá, de existir, rectificar los errores detectados, además, en esta fase se deben cargar los valores o las condiciones de frontera del proceso. En la Tabla 3 se muestran los valores de las constantes utilizadas en el modelo.

Tabla 3. Valores de las constantes que intervienen en el sistema secador.

| Abr. | Valor | Unid. |
|------|----------|--------------------------------|
| Cpg | 1.006 | $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ |
| Cpa | 4.1868 | $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ |
| Cpv | 1.890 | $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ |
| Cps | 3.715392 | $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ |
| R | 8314 | $\text{J/}^\circ\text{C kmol}$ |
| pmg | 28.966 | kg/kmol |
| pa | 18.02 | kg/kmol |

Varios de los datos inherentes a la caracterización física del cacao se han obtenido de [9] y para la obtención de constantes físicas del agua y del vapor se han obtenido de [10].

Los valores de las condiciones de frontera utilizados en la simulación de un experimento con el modelo presentado se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de frontera para el sistema secador.

| Abr. | Valor | Unid. |
|-----------|--------|------------------|
| λ | 2260 | kJ/kg |
| Fai | 0.03 | kg/s |
| Fgi | 0.5 | kg/s |
| Fgo | 0.025 | kg/s |
| Fsi | 0.05 | kg/s |
| Fvi | 0.001 | kg/s |
| H | 0.6 | |
| P | 100000 | Pa |
| Tgi | 50 | $^\circ\text{C}$ |
| Tsi | 29 | $^\circ\text{C}$ |
| s | 700 | kg/m^3 |

En la Figura 2 se observa la evolución de los valores de temperatura tanto del gas (aire caliente) como del sólido (cacao). El comportamiento está dentro del límite máximo que es de 50°C , temperatura del gas a la entrada del cilindro.

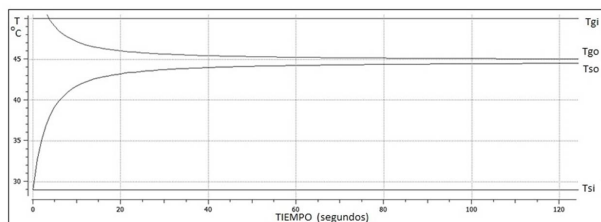


Figura 2. Curvas de temperatura para el aire caliente y para el cacao.

La curva de humedad del sólido refleja el comportamiento típico de un proceso de secado. Para este caso se ingresa cacao fermentado con un nivel de humedad del 60 %. La simulación se ejecuta para un tiempo de 10 horas. En la Figura 3 se observan los cambios de humedad en función del tiempo, registrándose un valor aproximado del 12 % de humedad en base húmeda. El valor de humedad óptimo requerido por el mercado es del 8 %.

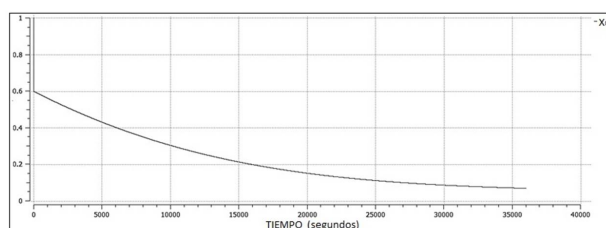


Figura 3. Curva de secado para el cacao.

El incremento de masa de cacao seco y decremento de masa de agua contenida en los granos de cacao se puede apreciar en la Figura 4. La relación o proporción de agua contenida en el cacao se refleja de forma clara a los 36000 s de tiempo transcurrido.

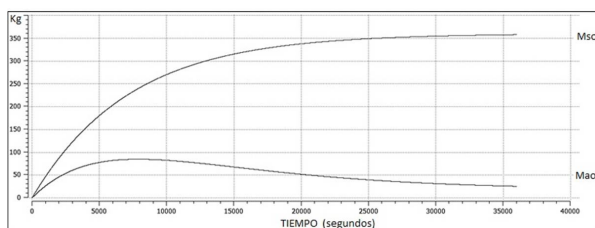


Figura 4. Variación de masa de cacao seco y de masa de agua contenida en el cacao.

4. Conclusiones

Las ecuaciones utilizadas en este trabajo corresponden a un modelo general de un secador rotatorio, pero se ha configurado el modelo con valores específicos para el secado de cacao.

Existen valores ingresados en el modelo que son aproximaciones, es decir, que las correlaciones utilizadas arrojan resultados que posteriormente deberían ser validados con ensayos experimentales. Este es el caso del coeficiente volumétrico de transmisión de calor, el tiempo de paso y la velocidad de evaporación del cacao.

Los ensayos de carácter experimental se deben realizar en una planta industrial o con un sistema prototipo para el secado de cacao.

La simulación ejecutada para un tiempo de 10 horas arroja resultados coherentes. Un nivel de humedad reducido del 60 % al 12 %, una masa de cacao seco de 310 kg, para una planta de 2 m de longitud con un diámetro de 0.5 m, permiten proponer la implementación del prototipo físico para secado de cacao. Este prototipo permitirá la validación del modelo simulado en este trabajo.

Referencias

- [1] F. Castaño, F. R. Rubio, and M. G. Ortega, "Modelado de secadores rotatorios en iso-corriente," *RIAI*, vol. 6, no. 4, pp. 32–43, 2009.
- [2] S. Savaresi, R. Bitmead, and R. Peirce, "On modelling and control of a rotary sugar dryer," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 3, pp. 249–266, 2001.
- [3] A. Iguaz, A. Esnoz, G. Martínez, A. López, and P. Vírveda, "Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer," *Journal of food engineering*, vol. 59, no. 2, pp. 151–160, 2003.
- [4] H. Didriksen, "Model based predictive control of a rotary dryer," *Chemical Engineering Journal*, vol. 86, no. 1, pp. 53–60, 2002.
- [5] S. Friedman and W. Marshall, "Studies in rotary drying Part II: Heat and mass transfer," *Chemical Engineering Progress*, vol. 45, pp. 573–588, 1949.
- [6] J. Nganhou, "Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans during drying," *Heat and mass transfer*, vol. 40, no. 9, pp. 727–735, 2004.
- [7] P. Y. McCormick, "Gas velocity effects on heat transfer in direct heat rotary dryers," *Chemical Engineering Progress*, vol. 58, no. 6, pp. 57–61, 1962.
- [8] R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill, 1992.

- [9] H. Tinoco and D. Ospina, “Análisis del proceso de deshidratación del cacao para la disminución del tiempo de secado,” *EIA*, no. 13, pp. 53–63, 2010.
- [10] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2003.